几种植物次生物质对褐稻虱种群的控制作用模拟

钟平生[1,2]，梁广文[1,*]，曾　玲[1]

(1. 华南农业大学昆虫生态研究室，广州　510642；2. 惠州学院生命科学系，广东惠州　516007)

摘要：为探讨褐稻虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)种群生态控制的作用机理，应用状态空间方程和作用因子添加分析法，研究植物次生物质不同组合对褐稻虱种群的控制作用；本研究以薇甘菊 *Mikania micrantha* 乙醇提取物、飞机草 *Eupatorium odoratum* 乙醇提取物与现代苦楝 *Melia azedarach* 油的不同组合，作用于褐稻虱种群；根据不同虫期的调查数据，拟合出控制矩阵中各分块矩阵的元素值，并对褐稻虱种群的控制作用进行模拟。结果表明：单独施用薇甘菊乙醇提取物(1 g DW/100 mL)、飞机草乙醇提取物(1 g DW/100 mL)、现代苦楝油(200 倍)各1次，能显著降低褐稻虱种群数量，然而种群趋势指数 *I*(population trend index)仍在1.00以上，即下代褐稻虱种群仍呈增长趋势，联合添加其中2种或3种能持续控制褐稻虱下代种群的增长。同时，植物次生物质对褐稻虱种群的控制作用主要表现在对成虫产卵的忌避作用，尤其是在本田种群建立的初期，由于其显著的忌避作用，降低田间卵量，使其种群数量明显降低，可有效地控制其为害。

关键词：褐稻虱；植物次生物质；作用因子添加法；模拟；薇甘菊；飞机草；苦楝；乙醇提取物

中图分类号：Q968　　**文献标识码**：A　　文章编号：0454-6296(2010)07-0767-06

Simulation of control effectiveness of several secondary metabolites against populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae)

ZHONG Ping-Sheng[1,2], LIANG Guang-Wen[1,*], ZENG Ling[1] (1. Laboratory of Insect Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Department of Life Sciences, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007, China)

Abstract: To research the effect mechanism on ecological control of population of the brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* (Stål), the control effect of secondary metabolities against BPH was simulated and evaluated using state space equation and factor-adding analysis method. The different combinations of alcohol extracts from *Mikania micrantha*, *Eupatorium odoratum* and *Melia azedarach* employed BPH population, and constructed the control model of *N. lugens* population system. Based on the data from different stages, the values of systematic matrix were fitted, and the control effect of secondary metabolities against BPH was simulated. The results showed that the secondary metabolites of *M. micrantha*, *E. odoratum*, *M. azedarach* applied alone, could drastically decrease the population quantity of BPH, yet the population trend index (*I*) was still above 1.00, which could not control BPH population to a sustainable decrease. Either two or three kinds of secondary metabolites simultaneously could control the increase of BPH population effectively. Meanwhile, the control mechanism of secondary metabolites on BPH population was their deterrent effect, especially in the initial stages of population development. The egg number of BPH was reduced significantly due to the strong deterrent effect on adults of BPH. As a result, the population number and the harm of BPH population were reduced significantly.

Key words: Brown planthopper (*Nilaparvata lugens*); secondary metabolites; factor-adding analysis method; simulation; *Mikania micrantha*; *Eupatorium odoratum*; *Melia azedarach*; alcohol extract

褐稻虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)是水稻的重要害虫之一。20世纪90年代后发生地区逐渐向北方扩展，我国每年因褐稻虱为害造成的直接损失稻谷10~15亿 kg(高春先等，1988；王守林等，2002)。

基金项目：国家重点基础发展规划("973"计划)项目(20006CB102006)；国家农业结构调整重大技术研究专项(2002-01-05A)

作者简介：钟平生，男，1964年出生，江西宜春人，博士，副教授，主要从事昆虫生态与害虫综合治理的教学与研究工作，Tel.: 13928319208; E-mail: zhongps@hzu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gwliang@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2010-01-07; 接受日期 Accepted: 2010-05-19

植物在抵御害虫进化过程中所形成的次生代谢物(secondary metabolites),可以单一或协同对害虫起作用,影响昆虫的产卵、生长、发育、行为与繁殖,构成植物的抗虫性(庞雄飞,1999;庞雄飞等,2000)。利用非嗜食植物次生物质对害虫的忌避和拒食作用,可有效控制褐稻虱(钟平生等,2004,2009;梁广文等,2005),但对其生态控制机理的研究未曾涉及。庞雄飞等(1995,1988)提出的害虫种群动态控制理论和状态空间分析法,可定量分析和客观评价作用因子对害虫种群系统的控制作用。本文以2002年广东省农业现代化示范区(江门市新会区沙堆镇)有机晚稻褐稻虱自然种群生命表为例,以植物次生物质对褐稻虱种群的控制作用指数作为添加因子,应用状态空间分析法就其对褐稻虱种群的控制作用进行模拟,研究对褐稻虱种群系统控制的可能性和有效性,探讨其控制的生态学机理。

1.1 供试材料

薇甘菊乙醇提取物、飞机草乙醇提取物由华南农业大学昆虫生态研究室提取,含量均为 1 g DW/mL(D 表示植物干物质,W 表示重量,即以 1 mL乙醇含植物干粉重 1 g 的提取物)。现代苦楝油(trilogy)由美国马里兰州哥伦比亚生化工厂生产,苦楝油的活性含量(a.i.)为3%。

1.2 试验方法

本试验于2002年9-10月,在广东省农业现代化示范区(江门市新会区沙堆镇)实施,按薇甘菊乙醇提取物、飞机草乙醇提取物与现代苦楝油组成不同组合,设以下6个处理组合。

处理组合1:薇甘菊乙醇提取物(1 g DW/100 mL)喷施1次;处理组合2:飞机草乙醇提取物喷施1次;处理组合3:现代苦楝油200倍喷施1次;处理组合4:现代苦楝油200倍+薇甘菊乙醇提取物各喷施1次;处理组合5:现代苦楝油+飞机草乙醇提取物各喷施1次;处理组合6:现代苦楝油+薇甘菊乙醇提取物+飞机草乙醇提取物各喷施1次;另设清水处理为对照。

试验于2002年有机晚稻齐粒丝苗品种上进行,当褐稻虱成虫始盛期(9月31日),施用现代苦楝油200倍;其后隔5 d喷施非嗜食植物次生物质。其中薇甘菊乙醇提取物(1 g DW/100 mL)施用时间为10月6日;飞机草乙醇提取物(1 g DW/100 mL)在处理5中施用时间为10月6日,处理6中施用时间为10月12日;喷施前、喷施后每3 d调查不同处理褐稻虱卵、若虫与成虫数量。在每一处理区内五点随机取样,每点调查20株,并以喷施清水为对照。每处理重复3次,试验地其他管理同常规稻田。

参照庞雄飞和梁广文(1995)的方法组建褐稻虱种群生命表。

2 结果与分析

2.1 种群系统的结构和控制模型

模型(图1)简明地描述了褐稻虱种群在各因子作用下的种群动态,大方框内为褐稻虱种群系统,褐稻虱种群系统按发育阶段划分为4个状态,即卵(X_E)、1~2龄若虫($X_{L1\text{-}2}$)、3~5龄若虫($X_{L3\text{-}5}$)和成虫(X_A),各状态间以存活率相连,植物次生物质可视为褐稻虱种群的边界作用因子,它以控制信号的形式分散作用于各个相应的状态,从而影响系统的输出。根据庞雄飞和梁广文(1995)害虫种群系统理论的状态空间分析法,则图1中模型用状态方程来表达为:

$$X(t_i) = (A + B + B' + B'')X(t_0)$$
$$Y(t_i) = CX(t_i)$$

图1 褐稻虱种群系统控制网络图

Fig. 1 The control model of *Nilaparvata lugens* population system

式中:$X(t_i)$和$X(t_0)$分别为时间t_i和t_0时的状态向量;A为系统矩阵;B,B'和B''为由分别组成的控制矩阵;C为输出矩阵。

系统矩阵A的标准形式是Leslie矩阵,该矩阵由两大部分组成,第1部分为第1行中的生殖力向量;第2部分为各虫期的存活率分块矩阵,每一分块矩阵均为对角矩阵。根据褐稻虱的发育历期,把褐稻虱种群各虫期为以天为单位,分为32个年龄组,即相应地把褐稻虱1个世代划分为由32个状态构成的系统($X_1 \sim X_{32}$),则其系统矩阵A为32×32维的Leslie矩阵。对角矩阵是以1 d为单位的等期状态,每一状态存活率是相等的,即每一对角矩阵内对角元素的值相等,$a_{i1} = a_{i2} = a_{i3} = \cdots a_{ik} = S_i^{1/k}$。成虫期分块矩阵为对角矩阵加上最后一列(全部为零)组成,元素值为1。其结构分别为:

$$A=\begin{vmatrix}0 & 0 & 0 & F_{1,i}\\ A_E & 0 & 0 & 0\\ 0 & A_S & 0 & 0\\ 0 & 0 & A_L & 0\\ 0 & 0 & 0 & A_A\end{vmatrix}$$

其中：

$$A_i=\begin{vmatrix}(S_i)^{1/k} & 0 & 0 & 0\\ 0 & (S_i)^{1/k} & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & (S_i)^{1/k} & 0\\ 0 & 0 & 0 & (S_i)^{1/k}\end{vmatrix}$$

控制矩阵 B，B'，B''与系统矩阵在结构上相同，根据庞雄飞作用因子的添加分析法，控制指数 Sa 的输入方式采用乘法输入，得到的结果为 $SaSi$，即对角矩阵内对角元素的值为 $b_{i1}=b_{i2}=b_{i3}=\cdots b_{ik}=(S_aS_i)^{1/k}$，其结构为：

$$B_i=\begin{vmatrix}(S_aS_i)^{1/k} & 0 & 0 & 0\\ 0 & (S_aS_i)^{1/k} & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & (S_aS_i)^{1/k} & 0\\ 0 & 0 & 0 & (S_aS_i)^{1/k}\end{vmatrix}$$

式中：bi，$SaSi$ 和 k 分别为第 i 个分块矩阵的对角元素值、虫期存活率和对角元素个数。系统输出矩阵 C 为：

$$C=\begin{vmatrix}1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1&1\end{vmatrix}_{4\times N}$$

2.2　褐稻虱种群动态控制状态方程的模拟结果

2.2.1　状态方程初始向量的估计：据田间系统调查资料，褐稻虱各虫期的发育历期，卵、1～2 龄若虫、3～4 龄若虫和成虫分别为 7 d，5 d，8 d，12 d，以 1 d 为 1 个状态变量，共划分为 32 个状态变量。根据对照区不同虫期的存活率调查数据，可计算出系统矩阵中各分块矩阵的元素值(表 1)。

系统矩阵中成虫生殖力向量由室内成虫逐日产卵试验所得(表 2)。将田间施用植物次生物质不同组合处理后褐稻虱各虫期的存活率添加到相应的虫期，得到其控制矩阵中分块矩阵的对角元素值(表 3)。

模拟运算的初始向量处理按下式进行：

$$X_{ij}=\frac{N_i(S_i)^{(j-1)/n_i}}{\sum_{k=i}^{n_i}S_i^{(k-1)/n_i}}$$

式中：X_{ij}为第 i 虫态第 j 状态的初始向量元素值；N_i—第 i 虫态的初期调查值；S_i—相应虫期存活率；n_i—相应虫期历期；$k=1，2，3，\cdots，n_i$；$j=1，2，3，\cdots，n_i$。

根据田间实际调查数据，不同处理间的褐稻虱起始种群数量值仅有卵(N_E)、1～2 龄若虫($N_{L1\text{-}2}$)、3～5 龄若虫($N_{L3\text{-}5}$)和成虫 S_A，由此可计算出其初始向量值如下。

表 1　褐稻虱各虫期存活率与系统矩阵中分块矩阵的元素值

Table 1　The survival rates in different developmental stages of *Nilaparvata lugens* and the value of systematic matrix

分块矩阵 Matrix	对角元素个数 k Number of diagonal elements	虫期存活率 S_i Survival rate	系统矩阵元素值 $a_i=(S_i)^{1/k}$ Values of matrix element
S_E	7	0.8212	0.9723
$S_{L1\text{-}2}$	5	0.8265	0.9626
$S_{L3\text{-}5}$	8	0.8130	0.9743
S_A	12	0.3587	0.9181

表 2　褐稻虱种群系统矩阵中的成虫生殖力元素值

Table 2　The longevity and fecundity of *Nilaparvata lugens* adults

产卵天数 Longevity (d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
产卵量(粒/♀) Eggs laid per female	12.1	10.2	8.6	7.2	6.1	5.1	4.3	3.7	3.1	2.6	2.2	1.8

表 3　植物次生物质不同组合处理后褐稻虱种群控制矩阵中分块矩阵元素值

Table 3　The survival rates in different developmental stages of *Nilaparvata lugens* and the value of systematic matrix

处理编号 Treatment no.	控制矩阵中分块矩阵的存活率和元素值 Survival rates and values of matrix							
	S_E		$S_{L1\text{-}2}$		$S_{L3\text{-}5}$		S_A	
	存活率 S_iS_a	元素值 b_i	存活率 S_iS_a	元素值 b_i	存活率 S_iS_a	元素值 b_i	存活率 S_iS_a	元素值 b_i
1	0.3297	0.8778	0.6505	0.9532	0.6718	0.9764	0.3587	1.0000
2	0.3207	0.8743	0.6024	0.9387	0.6835	0.9785	0.3587	1.0000
3	0.6717	0.8929	0.5058	0.9065	0.5770	0.9580	0.3587	1.0000
4	0.1211	0.7608	0.6200	0.9441	0.7132	0.9837	0.3587	1.0000
5	0.1480	0.7829	0.5626	0.9539	0.6938	0.9786	0.3587	1.0000
6	0.1222	0.7617	0.5895	0.9346	0.6563	0.9736	0.3587	1.0000

$N_E=[X_1, X_2, \cdots, X_7]^T = N_E = [19.5552, 19.0134, 18.4827, 17.9686, 17.4738, 17.3956, 16.5196]^T$。

$N_{L1-2}=[X_8, X_9, \cdots, X_{12}]^T=[5.3883, 5.1868, 4.9928, 4.8061, 4.6263]^T$。

$N_{L3-5}=[X_{13}, X_{14}, \cdots, X_{20}]^T=[8.7428, 8.5199, 8.3026, 8.0908, 7.8846, 7.6835, 7.4876, 7.2966]^T$。

$N_A=[X_{21}, X_{22}, \cdots, X_{32}]^T=[12.0793, 10.1816, 8.5821, 7.2339, 6.0975, 5.1395, 4.3321, 3.6515, 3.0779, 2.5944, 2.1868, 1.8432]^T$。

将 4 个虫期的初始向量分量组合起来，由此初始向量 $X(t_0)$ 为：

$$X(t_0) = X_E(t_0)X_{L1-2}(t_0)X_{L3-5}(t_0)X_A(t_0)^T$$

2.2.2　单次施用植物次生物质的模拟结果：按以上数据对施用植物次生物质处理后稻田褐稻虱种群数量动态进行模拟分析，可得从 9 月 27 日起 32 d 内褐稻虱的卵、1～2 龄若虫、3～5 龄若虫和成虫的数量动态，见图 2(A～G)。

由图 2 可知，植物次生物质不同组合处理可以显著压低褐稻虱种群数量。单独施用薇甘菊乙醇提取物(1 g DW/100 mL)、飞机草乙醇提取物 1 g DW/100 mL、现代苦楝油 200 倍各 1 次，可以显著地降低下一代稻褐飞虱种群卵量、若虫和成虫数量，但种群数量仍呈增长趋势。

同时，植物次生物质对褐稻虱种群数量的控制作用主要是同其对成虫产卵的显著忌避作用有关。在晚稻本田种群建立初期，由于植物次生物质对成虫显著的忌避作用，其卵量基数显著降低，从而有效地控制其下代种群的发展。但从褐稻虱种群数量的绝对值来看，其种群增长数量还是比较高的，尤其是在 15 d 以后，种群增长比较迅速，这表明尽管植物次生物质对褐稻虱种群数量具有一定的控制作用，但从持续控制的角度分析，仅仅采用这一措施还不能完全控制其种群数量的增长，要结合其他措施同时应用，方可使其为害降低下来(图 2：B～D)。

2.2.3　联合施用植物次生物质的模拟结果：薇甘菊乙醇提取物 1 g DW/100 mL 与现代苦楝油 200 倍各添加 1 次或 3 种植物次生物质同时添加 1 次，可使下代褐稻虱种群的数量不再增长而呈下降趋势(图 2：E～G)。而在对照区，褐稻虱种群的数量远远大于各处理区内的褐稻虱种群数量，经过一个世代的繁殖后，下代卵、若虫和成虫在高峰期时分别高达 676 头/50 株、734 头/50 株和 99 头/50 株左右(图 2：A)。

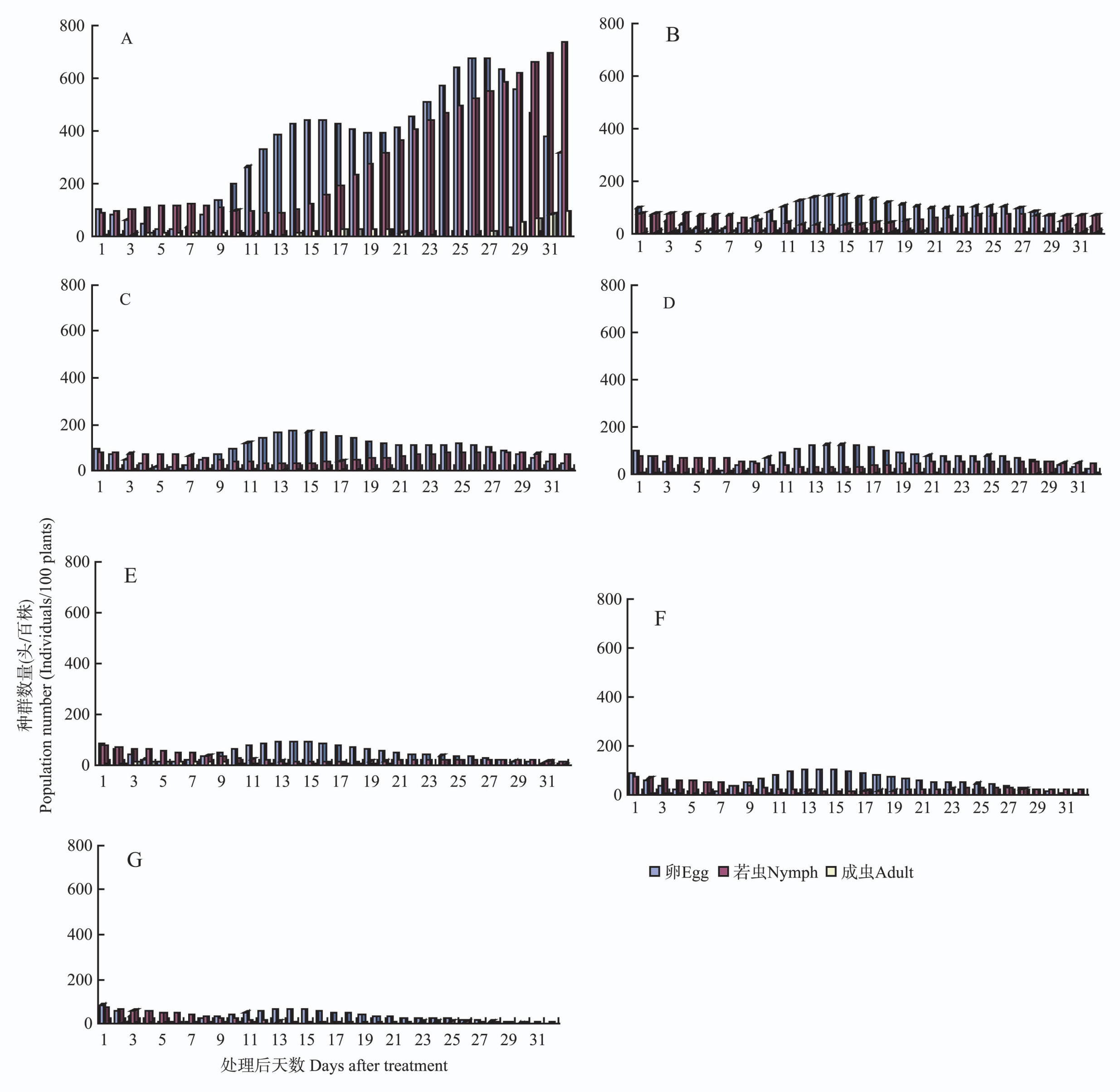


图 2　植物次生物质对褐稻虱种群系统的控制模拟

Fig. 2　Simulation of control effectiveness of secondary metabolites on populations of *Nilaparvata lugens* in autumn

A：对照（清水）Control (water)；B：薇甘菊 *Mikania micrantha*；C：飞机草 *Eupatorium odoratum*；D：现代苦楝油 *Melia azedarac*；E：薇甘菊 + 现代苦楝油 *M. micrantha* + *M. azedarach*；F：飞机草 + 现代苦楝油 *E. odoratum* + *M. azedarach*；G：薇甘菊 + 飞机草 + 现代苦楝油 *M. micrantha* + *E. odoratum* + *M. azedarach*

3　讨论

晚稻本田中，稻田褐稻虱虫源除稻田累积外，大部分是来自稻田生境以外或邻近稻田。对于这一部分虫源，可采用异源植物次生化合物的显著拒避作用，将其阻隔在本田以外，降低虫口基数，减轻为害。研究结果表明植物次生物质对褐稻虱种群的控制作用是十分显著的，其控制的主要机理表现在对成虫的显著产卵忌避与拒食作用（钟平生等，2004，2009）。因此，应用异源植物次生化合物控制稻田生境以外的虫源是水稻害虫生态控制的重要策略，亦是解决水稻主要害虫猖獗为害的重要途径。

本研究结果表明，单独施用植物次生化合物可以显著控制褐稻虱种群，然而施用后的褐稻虱种群趋势指数 *I* 仍在 1.00 以上，而薇甘菊乙醇提取物 1 g DW/100 mL 与现代苦楝油 200 倍各添加 1 次或 3 种植物次生物质同时添加 1 次，可达到使下代褐稻虱种群的数量呈下降趋势的作用。因此，从其持续控制的角度分析，仅仅采用单一措施还不能完全控制其种群数量的持续增长，需要根据卵量基数，

结合其他措施，如与生物制剂或次生物质之间等进行联合作用，才能压低种群基数，减轻为害。

褐稻虱是具有暴发性的迁飞性害虫，在防治策略上必须贯彻“预防为主、综合防治”的原则，采取以农业防治为基础，加强预测预报，通过合理使用化学农药，保护和利用害虫天敌，将害虫密度控制在经济为害允许水平之下（Denno and Roderick，1990）。鉴于化学防治是当前控制褐稻虱的重要手段，而且褐稻虱对多种药剂产生了不同程度的抗药性，因此植物次生物质具有广阔的应用前景。植物提取物的组分非常复杂，对于组分的分离纯化、标准化生产有待于进一步探求。

参 考 文 献（References）

Denno RF, Roderick GK, 1990. Population biology of planthoppers. *Annu. Rev. Entomol.*, 35: 489－520.

Gao CX, Gu XH, Bei YW, Wang RM, 1988. A study on the cause of resurgence of brown planthopper (BPH). *Acta Ecologica Sinica*, 8(2): 155－163.［高春先，顾秀慧，贝亚雄，王仁民，1988. 褐稻虱再猖獗原因的探讨. 生态学报，8(2): 155－163］

Liang GW, Zhong PS, Zeng L, 2005. Effect of different measures of ecological management on the population of brown planthoppers in organic rice fields. *Chin. Bull. Entomol.*, 42(5): 510－514.［梁广文，钟平生，曾玲，2005. 有机稻田内不同生态措施对褐稻虱种群的控制作用. 昆虫知识，42(5): 510－514］

Pang XF, 1999. Plant protectants and plant immune engineering against insect pests. *World Sci-Tech R & D*, 21(2): 24－28.［庞雄飞，1999. 植物保护剂与植物免害工程——异源次生化合物在害虫防治中的应用. 世界科技研究与发展，21(2): 24－28］

Pang XF, Liang GW, 1995. System Control of Insect Pest Population. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. 15－30.［庞雄飞，梁广文，1995. 害虫生态控制系统. 广州：广东科学技术出版社. 15－30］

Pang XF, Liang GW, You MS, Wu WJ, 1988. State-space approach to population life systems. *J. South China Agric. Univ.*, 9(2): 1－10.［庞雄飞，梁广文，尤民生，吴伟坚，1988. 昆虫种群生命系统研究的状态方程. 华南农业大学学报，9(2): 1－10］

Pang XF, Zhang MX, Hou YM, Jiao Y, Cen YJ, 2000. Evaluation of plant protectants against pest insects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(1): 108－110.［庞雄飞，张茂新，侯有明，焦懿，岑依静，2000. 植物保护剂防治害虫效果的评价方法. 应用生态学报，11(1): 108－110］

Wang SL, Dong DW, Zheng YZ, Mei DQ, Xiang M, Zheng J, 2002. The reasons of outbreak of rice planthopper and the advances on its managing strategies. *Plant Protection Technology and Extension*, 22(8): 27－35.［王守林，董代文，郑永忠，梅道强，向明，郑军，2002. 稻飞虱严重发生原因分析及改进治理对策的实践. 植保技术与推广，22(8): 27－35］

Zhong PS, Liang GW, Zeng L, 2004. Effects of semio-chemical of the non-host plant on brown planthopper (*Nilaparvata lugens*). *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 17(2): 13－18.［钟平生，梁广文，曾玲，2004. 非嗜食植物次生化合物对褐稻虱实验种群的控制作用. 仲恺农业技术学院学报，17(2): 13－18］

Zhong PS, Liang GW, Zeng L, 2005. Effect of different ecological control on population of brown planthopper and its natural enemy community. *Journal of Anhui Agricultural University*, 32(4): 428－430.［钟平生，梁广文，曾玲，2005. 不同生态措施对褐稻虱种群及其天敌的影响. 安徽农业大学学报，32(4): 428－430］

Zhong PS, Liang GW, Zeng L, 2009. Antifeedant effect of alcohol extracts of the non-preferable plants on brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Chin. Bull. Entomol.*, 46(4): 620－623.［钟平生，梁广文，曾玲，2009. 植物粗提物对褐稻虱成虫取食的影响. 昆虫知识，46(4): 620－623］

（责任编辑：袁德成）